

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920131152913

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于观测器的单相逆变器电流跟踪算法研究

Research on current tracking methods of single-phase inverter
based on observer

吴 扬 波

指导教师姓名: 王 一 菊 副 教 授

专 业 名 称: 电气检测技术及仪器

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

近年来, 逆变技术作为电力电子技术的一个重要分支, 在交流驱动、有源滤波器、静止无功补偿器、电网互联等方面得到了广泛的应用。逆变器作为电网中的重要接口设备, 其性能的优劣决定了电能的质量。因此, 吸引了大量学者致力于逆变控制技术研究。

逆变器控制的核心问题是电流跟踪控制。模型预测控制算法具有控制效果好、鲁棒性强等优点, 可有效地克服过程的不确定性、非线性和耦合性, 因此, 在电力电子领域得到了广泛的应用。然而, 模型预测控制是一类基于模型的控制方法。在实际应用中, 系统模型与真实被控系统之间总存在着偏差, 这将大大降低系统的动态性能和控制精度, 甚至会破坏系统的稳定性。

本文从模型未知偏差消除和精确电流跟踪这两个主要问题出发, 提出了三种单相逆变器自适应电流跟踪方法。三种方法均基于观测器技术结合有限集模型预测控制的架构, 主要创新点在于观测器的设计上。通过在线辨识和补偿模型中的未知偏差, 获得准确的系统模型, 最终实现精确电流跟踪。

第一种方法将模型误差描述为两个同频同相但幅值不同的正弦和余弦信号相加的形式, 进而将原电路方程增广为三阶时变状态空间模型, 并基于此设计了类龙贝格观测器。由拉塞尔不变集原理证明了其稳定性。

第二种方法则将模型误差描述为幅值相位未知的正弦信号, 并通过构造辅助变量的形式, 将电路方程增广为三阶时不变状态空间模型, 并基于此设计了龙贝格观测器, 由李亚普若夫稳定性原理保证其稳定。

第三种方法利用多采样控制器结构的特点, 将模型误差描述为常量, 进而获得二阶时不变状态空间模型, 并基于此设计了龙贝格观测器, 由李亚普若夫稳定性原理保证其稳定。

为了验证控制策略的有效性, 本文还设计了一套快速控制原型实验平台。该实验平台是基于美国国家仪器公司的嵌入式控制器 CompactRIO 开发的, 集在线调参、在线监视、数据记录、实时控制为一体, 具有良好的扩展性, 并且与科学数据分析软件 Matlab 相兼容, 方便后期的数据离线分析。

Matlab 仿真结果和实验结果证明，本文所提及的方法能实现精确的电流跟踪，且电流谐波畸变小，具有良好的鲁棒性，过渡时间短，能快速地从扰动中恢复稳定。

关键词：逆变器；观测器；电流跟踪

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

In the last several years, as a significant branch of power electronic, inverter technology nowadays has been widely used in AC drive, APF, SVC, and Grid Connecting, etc. And inverter is a vital interface equipment, whose performance determines directly the quality of power. Therefore, this field has attracted much attention from scholars.

The core problem of inverter control is realizing current tracking. Model Predictive Control(MPC) can effectively deal with the uncertainty, nonlinearity and coupling in process, with good performance and robustness. So, it has been widely used in power electronics lately. However, it is a kind of control method based on model. In a practical application, deviation is inevitable between system model and the actual controlled plant, which will degrade the dynamic performance and accuracy. worse still, excessive offset will undermine the stability of the system.

In this paper, three adaptive current tracking methods for single phase inverter are proposed, aiming at eliminating the unknown offset and achieving precise current tracking. All of them are based on a structure of observer technology combining with finite control set model predictive control(FCS-MPC). The main contribution of this work is observer design. By online identifying the deviation, a precise system model will be attained, and accurate current tracking can be achieved.

In the first method, deviation is expressed as sum of a sinusoidal signal and a cosine signal, whose amplitude is different, but phase and frequency same. Then, the equation of the circuit can be extended to a 3-D time varying state space model. A quasi Luenberger observer is designed based on this model, whose stability can be proved by Russell invariant set theory.

In the second method, deviation is expressed as a sinusoidal signal with unknown amplitude and phase. By constructing a auxiliary variable, the equation of the circuit can be extended to a 3-D time invaring state space model. A Luenberger observer is designed based on this model, whose stability can be proved by Lyapunov theory.

In the third method, deviation is described as a constant on account of the characteristic of the multi-sampling controller structure. Then, a 2-D time invarying state space model can be obtained. A Luenberger observer is designed based on this model, whose stability can be proved by Lyapunov theory.

To verify the validation of the proposed methods, a Rapid Control Prototype platform is designed in this paper. The platform is implemented based on an embedded controller of National Instrument—CompactRIO, integrated with online parameters adjustment, status monitoring, data acquiring and real-time control. Moreover, it is compatible with Matlab, which makes the offline data analysis more convenient.

Simulation and experiment proved that, the proposed methods can realize precise current tracking with low THD, good robustness and rapid transition.

Key words: Inverter; Observer; Current Tracking

目 录

第一章 绪论	1
1.1 逆变器的应用背景	1
1.2 逆变器电流跟踪方法综述	2
1.3 自适应模型预测控制	6
1.4 本文的主要贡献及章节安排	7
第二章 基于 CompactRIO 的快速原型实验平台的设计与实现	11
2.1 硬件系统的设计与实现	11
2.2 软件算法的设计与实现	15
2.3 本章小结	20
第三章 基于正弦特性的线性时变观测器设计	21
3.1 正弦偏差描述与时变状态空间模型	21
3.2 类龙贝格状态观测器设计	24
3.3 仿真结果	26
3.4 实验结果	32
3.5 本章小结	39
第四章 基于正弦特性的线性时不变观测器设计	41
4.1 正弦偏差描述与时不变状态空间模型	41
4.2 龙贝格状态观测器设计	43
4.3 仿真结果	44
4.4 实验结果	48
4.5 本章小结	52
第五章 基于多采样率结构的线性时不变观测器设计	53
5.1 常量偏差描述与时不变状态空间模型	53
5.2 龙贝格状态观测器设计	55
5.3 仿真结果	56
5.4 本章小结	61

第六章 总结与展望	63
6.1 工作总结	63
6.2 工作展望	64
附录 A 电流模型预测控制算法	67
A.1 模型预测控制算法原理	67
A.2 本文中的应用	69
参考文献	71
攻读硕士学位期间取得的科研成果	75
致 谢	77

Contents

1	Introduction	1
1.1	Application background of Inverter.....	1
1.2	Review of Current Control Method of Inverter.....	2
1.3	Adaptive Model Predictive Control	6
1.4	Main Contribution and Chapter Arrangement	7
2	Design and Realization of the Rapid Prototyping Platform based on CompactRIO	11
2.1	Design and Realization of the Hardware System	11
2.2	Design and Realization of the Algorithm and Software	15
2.3	Summary	20
3	Linear Time-Variant Observer Design based on Sinusoidal Char- acteristic	21
3.1	Sinusoidal Deviation and Time-Variant State Space Model	21
3.2	Design of Quasi Luenberger State Observer	24
3.3	Simulation	26
3.4	Experiment	32
3.5	Summary	39
4	Linear Time-Invariant Observer Design based on Sinusoidal Characteristic	41
4.1	Sinusoidal Deviation and Time-Invariant State Space Model	41
4.2	Design of Luenberger State Observer	43
4.3	Simulation	44
4.4	Experiment	48
4.5	Summary	52
5	Linear Time-Invariant Observer Design based on Multisampling Structure	53
5.1	Constant Deviation and Time-Invariant State Space Model	53

5.2 Design of Luenberger State Observer	55
5.3 Simulation	56
5.4 Summary	61
6 Summary and Outlook	63
6.1 Summary	63
6.2 Prospect for Future Work	64
A Current Model Predictive Control Algorithm	67
A.1 Fundamental of Model Predictive Control	67
A.2 Application in this work	69
References	71
Publications and Rewards	75
Acknowledgement	77

第一章 绪论

随着电力电子技术的飞速发展，逆变技术在交流电力拖动、有源电力滤波、无功功率补偿和分布式发电系统等领域得到了广泛地应用。电流跟踪控制方法是逆变器控制器设计的核心命题，直接决定着系统的性能。本章首先对逆变器的应用基础做下简单介绍，接着引出逆变器电流跟踪方法综述，最后交代了本文的主要贡献和后续的章节安排。

1.1 逆变器的应用背景

过去的几十年间，电力电子技术呈现突飞猛进的发展态势。主要表现在三个方面：新材料的应用，诸如碳化硅、氮化镓等，使开关器件向高频、高压、大功率方向发展；各种新式拓扑的涌现；先进控制算法的深入研究。逆变技术作为电力电子技术的一个重要分支，广泛地应用于交流电力拖动、有源电力滤波、无功功率补偿和分布式发电系统等^[1-4]。

不同的应用领域有着不同的指标和要求。在交流运动控制系统的应用中，要求电动机的转速和转角快速准确地按人们期望的规律变化，满足这些要求的唯一途径便是实现对电机转矩的精确控制，而逆变器输出的交流电流直接决定了转矩控制的效果，电流脉动将体现为转矩脉动。在分布式发电系统的应用中，诸如小型风电系统和光伏系统，逆变器通常作为发电侧和电网的接口，用于将电能从分布式能源输送至公用电网，国际上对于这类接口设备也制定了一系列规范，如 IEEE 1547、UL 1741 等，保证其向网侧注入高质量的电能。在有源电力滤波器的应用中，要求逆变器输出幅值、相位准确且具有低 THD 的正弦电流，用以消除电网电流中特定阶次的谐波。

纵观上述各类应用，可以发现电流跟踪控制是逆变器控制器设计的核心命题，一个高性能的电流控制器必须保证输出电流具有较低的谐波畸变，快速的暂态响应和较小的稳态误差。逆变器技术应用至今，国内外学者对电流跟踪策略做了大量的研究，主要可以分成以下几类：

1. 电流滞环控制算法；

2. 线性控制算法;
3. 滑模控制算法;
4. 预测控制算法;
5. 其他控制算法, 包括模糊控制、神经网络、神经-模糊控制等先进控制算法。

1.2 逆变器电流跟踪方法综述

1.2.1 电流滞环控制算法

电流滞环控制是一种非常常见的电流跟踪方法。最基本的实现就是利用电流滞环比较器, 预设好滞环的上下限, 当电流偏差 (测量值与期望值之差) 超过上限时, 就触发开关管使电流减小, 直至低于下限时, 再触发开关管使电流增大。因此, 电流的跟踪精度与滞环宽度密切相关, 当环宽较大时, 开关通断频率低, 电流精度较低, 反之, 则电流精度高, 然而却受限于功率器件所能承受的开关频率。

电流滞环控制方法跟踪精度高, 响应速度快, 而且鲁棒性强, 但由于器件的开关频率不定, 难以根据开关频率的最大值选择器件, 而且难以在后级设计滤波器。为了克服这个缺点, 实现频率的稳定, 国内外学者做了大量研究^[5-10]。研究主要可以分为变滞环宽度和无滞环两大类, 其中文献 [5-7] 属于前者, 而文献 [8-10] 属于后者。[5] 斜率固定的变滞环宽度算法。[6] 解耦变滞环算法。[8] 利用每次开关周期的电流误差平均值为零来预测开关通断的时间。

[7] 把一次开关周期分为通、断两段, 通过测量相邻过零点的时间, 结合电路模型和三角几何特性, 实时地更新滞环的上下限, 并且提出了补偿死区抖动的策略。该方法具有较强的鲁棒性, 过渡过程短, 但是计算复杂。

[9] 将一次开关周期分为通、断、通、断四段。通过测量第一段上升时间作为反馈, 结合期望频率、期望电流变化率、电流误差直接计算开关管通断时间, 而没有传统的滞环带。该方法具更低的稳态误差, 但反馈回路增加了实现的复杂性。

[10] 借鉴了 [8,9] 的思想, 利用一次通断的电流增量应与期望电流增量相等, 直接计算开关通断时间, 并且为了增加方法的鲁棒性, 还在模型中, 增加了电感参数预测。该方法具有较快的动态响应, 但是方法难以推广至其他拓扑。

总之, 随着微处理器和数字逻辑器件的性能不断提升, 滞环电流控制算法也更加复杂, 趋向于与其他算法互相结合, 互补优势, 具有更好的性能。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.